

Séries numériques

Table des matières

2	Séries numériques	1
2.1	Définitions	1
2.2	Séries à termes positifs	5
2.2.1	Convergence des séries à termes positifs	5
2.2.2	Critères de comparaison	6
2.2.3	Comparaison avec une intégrale	6
2.2.4	Encore des critères de comparaison	11
2.2.5	Comparaison logarithmique	12
2.2.6	Plan d'étude d'une série à terme général positif	14
2.3	Séries à termes non nécessairement positifs	14
2.3.1	Absolute convergence	14
2.3.2	Séries alternées	15
2.3.3	Plan d'étude d'une série à termes non nécessairement positifs	17
2.4	Formule de Stirling	17
2.5	Produit de Cauchy de deux séries complexes	18
2.6	Hors programme : séries de Bertrand	20
2.7	L'essentiel	20

Les paragraphes 2.1, 2.2.1, 2.2.2, 2.2.4 et 2.3.1 sont des rappels de première année.

2.1 Définitions

DÉFINITION 2.1 ★ Série

On considère une suite $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$ à valeurs réelles (ou complexes). On lui associe la suite des *sommes partielles* $(S_n)_{n \in \mathbb{N}}$ définie par

$$\forall n \in \mathbb{N}, \quad S_n = \sum_{k=0}^n u_k$$

- On appelle *série* de terme général u_n , la suite (S_n) de terme général S_n que l'on note $\sum u_n$.
- On dit que la *série* $\sum u_n$ *converge* si et seulement s'il existe $S \in \mathbb{R}$ tel que $S_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} S$. Sinon, on dit que la série $\sum u_n$ *diverge*.

— Lorsque la série $\sum u_n$ converge, on dit que S est la *somme de la série* et l'on note

$$S = \sum_{n=0}^{+\infty} u_n$$

Remarque 2.1 Ne pas confondre les notations, on peut parler d'une série $\sum u_n$ même si la série ne converge pas. Par contre, la notation $\sum_{n=0}^{+\infty} u_n$ désigne la somme d'une série qui n'a de sens que si la série converge. Cette notation représente une *limite* et non pas une somme « infinie » ...

Remarque 2.2 Il se peut que la suite (u_n) ne soit définie qu'à partir d'un rang n_0 . On parle également de la série $\sum u_n$, les sommes partielles n'étant définies qu'à partir du rang n_0 :

$$S_n = \sum_{k=n_0}^n u_k$$

et si la suite $(S_n)_{n \geq n_0}$ converge, on note sa limite $\sum_{n=n_0}^{+\infty} u_n$

Remarque 2.3 Étudier la *nature* d'une série $\sum u_n$ consiste à préciser si la série converge ou diverge.

Remarque 2.4 Une série n'est pas autre chose qu'une suite. On peut donc lui appliquer les résultats vus en première année concernant les suites réelles ou complexes.

PROPOSITION 2.1 ★★★ Espace vectoriel des séries convergentes

L'ensemble des suites $E = \{(u_n) \in \mathbb{K}^{\mathbb{N}} \mid \sum u_n \text{ converge}\}$ est un \mathbb{K} -espace vectoriel. L'application

$$S : \begin{cases} E & \longrightarrow \mathbb{K} \\ (u_n)_{n \in \mathbb{N}} & \longmapsto \sum_{n=0}^{+\infty} u_n \end{cases}$$

est une forme linéaire sur E.

Démonstration Remarquons que E est un sous-ensemble de $\mathbb{K}^{\mathbb{N}}$. Pour montrer que E est un \mathbb{K} -espace vectoriel, il suffit de montrer que c'est un sous-espace vectoriel de $\mathbb{K}^{\mathbb{N}}$.

L'ensemble E des séries convergentes est non vide car il comporte la série de terme général nul.

Soient $\sum u_n, \sum v_n \in E$ deux séries convergentes. Pour $n \in \mathbb{N}$, on note S_n et T_n la n ème somme partielle respectivement associée à $\sum u_n$ et $\sum v_n$. Soient aussi $\alpha, \beta \in \mathbb{K}$. Dire que $\sum u_n, \sum v_n$ sont convergentes revient à dire que $(S_n)_{n \in \mathbb{N}}$ et $(T_n)_{n \in \mathbb{N}}$ sont des suites convergentes. Mais alors par théorème sur les suites, $\alpha(S_n)_{n \in \mathbb{N}} + \beta(T_n)_{n \in \mathbb{N}} = (\alpha S_n + \beta T_n)_{n \in \mathbb{N}}$ est aussi une suite convergente. Donc

$\sum (\alpha u_n + \beta v_n)$ est convergente. On note $\sum_{n=0}^{+\infty} (\alpha u_n + \beta v_n)$ sa somme.

De plus, si $S = \lim S_n = \sum_{n=0}^{+\infty} u_n$ et si $T = \lim T_n = \sum_{n=0}^{+\infty} v_n$ alors $\alpha S_n + \beta T_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} \alpha S + \beta T$, ce qui s'écrit aussi $\alpha \sum_{n=0}^{+\infty} u_n + \beta \sum_{n=0}^{+\infty} v_n = \sum_{n=0}^{+\infty} (\alpha u_n + \beta v_n)$.

Remarque 2.5 En particulier, si $\sum u_n$ et $\sum v_n$ sont convergentes de somme respectives S et T alors pour tout $\alpha, \beta \in \mathbb{K}$, la série $\alpha \sum u_n + \beta \sum v_n$ est convergente de somme $\alpha S + \beta T$.

⚠ Attention 2.1 On ne peut écrire $\sum_{n=0}^{\infty} (u_n + v_n) = \sum_{n=0}^{\infty} u_n + \sum_{n=0}^{\infty} v_n$ qu'après avoir vérifié que les séries $\sum (u_n + v_n)$, $\sum u_n$ et $\sum v_n$ sont convergentes.

PROPOSITION 2.2

Une série à termes complexes converge si et seulement si les séries partie réelle et partie imaginaire associées convergent.

Démonstration Laissez en exercice.

THÉORÈME 2.3 ★ Séries grossièrement divergentes

Il y a un lien important entre la suite (u_n) et la suite des sommes partielles (S_n) :

$$\forall n \geq 1, \quad u_n = S_n - S_{n-1}$$

On en déduit que

$$\sum u_n \text{ CV} \implies u_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} 0$$

Lorsque la suite (u_n) ne converge pas vers 0, on dit que la série $\sum u_n$ est *grossièrement divergente*.

Démonstration

$$\begin{cases} S_n &= u_0 + \dots + u_{n-1} + u_n \\ S_{n-1} &= u_0 + \dots + u_{n-1} \end{cases}$$

En faisant la différence, $u_n = S_n - S_{n-1}$. Si la série $\sum u_n$ converge, il existe $S \in \mathbb{R}$ tel que $S_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} S$, mais alors $S_{n-1} \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} S$ et par les théorèmes généraux,

$$u_n = S_n - S_{n-1} \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} S - S = 0$$

Remarque 2.6 Il ne suffit pas que $u_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} 0$ pour que la série converge. On verra que la série $\sum \frac{1}{n}$ diverge et pourtant $\frac{1}{n} \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} 0$.

Remarque 2.7 Pour étudier la nature et calculer la somme d'une série $\sum u_n$, il est intéressant de trouver une suite (v_n) telle que

$$\forall n \in \mathbb{N}, \quad u_n = v_{n+1} - v_n$$

Alors le télescopage permet de calculer explicitement la somme partielle :

$$S_n = \sum_{k=0}^n u_k = \sum_{k=0}^n (v_{k+1} - v_k) = v_{n+1} - v_0$$

La série $\sum u_n$ converge si et seulement si la suite (v_n) converge et dans ce cas,

$$\sum_{n=0}^{+\infty} u_n = \lim_{n \rightarrow +\infty} v_n - v_0$$

Remarque 2.8 Pour étudier une suite (v_n) , il peut être également intéressant d'étudier la convergence de la série $\sum t_n$ où $t_n = (v_n - v_{n-1})$. En effet,

$$v_n = (v_n - v_{n-1}) + (v_{n-1} - v_{n-2}) + \dots + (v_1 - v_0) + v_0 = v_0 + \sum_{k=1}^n t_k$$

Par conséquent,

$$\text{la suite } (v_n) \text{ converge} \iff \text{la série } \sum t_n \text{ converge}$$

PROPOSITION 2.4 ★ On ne modifie pas la nature d'une série en modifiant un nombre fini de termes

Si (u_n) et (v_n) sont deux suites telles qu'il existe $n_0 \in \mathbb{N}$ avec $\forall n \geq n_0, u_n = v_n$, alors les séries $\sum u_n$ et $\sum v_n$ sont de même nature.

Démonstration Introduisons les sommes partielles des deux séries :

$$\forall n \in \mathbb{N}, \quad S_n = \sum_{k=0}^n u_k \quad T_n = \sum_{k=0}^n v_k$$

Alors pour $n \geq n_0$,

$$\begin{aligned} T_n &= \sum_{k=0}^{n_0-1} v_k + \sum_{k=n_0}^n v_k \\ &= \sum_{k=0}^{n_0-1} u_k + \left(\sum_{k=0}^{n_0-1} v_k - u_k \right) \\ &= S_n + C \end{aligned}$$

où C est une constante ne dépendant pas de n . Par conséquent, la suite (T_n) converge si et seulement si la suite (S_n) converge.

DÉFINITION 2.2 ★ Reste d'une série convergente

Soit une série $\sum u_n$ convergente. Notons $(S_n)_{n \in \mathbb{N}}$ la suite de ses sommes partielles et $S = \sum_{n=0}^{+\infty} u_n$ sa somme. On appelle *reste d'ordre n* de la série $\sum u_n$, la suite de terme général $R_n = S - S_n$ notée

$$R_n = \sum_{k=n+1}^{+\infty} u_k$$

On a $R_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} 0$ et la relation

$$\forall n \in \mathbb{N}, \quad S_n + R_n = \sum_{n=0}^{+\infty} u_n$$

Remarque 2.9 On veut calculer une valeur approchée de la somme d'une série $\sum u_n$:

$$S = \sum_{k=0}^{+\infty} u_k$$

On décide de prendre comme valeur approchée de cette somme, la somme partielle de la série :

$$S_n = \sum_{k=0}^n u_k$$

Puisque $S_n + R_n = S$, l'erreur commise dans cette approximation est le reste de la série :

$$|S - S_n| = |R_n|$$

On peut écrire la procédure Python suivante qui prend en argument une fonction f telle que $u_n = f(n)$, un entier n et calcule la somme partielle S_n de la série :

```
#première possibilité
def somme_partielle(f,n):
    S=0
    for i in range(0,n+1):
        S+=f(i)
    return(S)

#seconde possibilité
sum([f(i) for i in range(0,n+1)])
```

Le problème consiste à déterminer la valeur de n pour être sûr que S_n soit une valeur approchée à ϵ près de L . On résout ce problème si l'on sait majorer simplement le reste R_n . Si par exemple $R_n \leq \frac{1}{n}$, pour obtenir une valeur approchée à 10^{-p} près, il suffit que $\frac{1}{n} \leq 10^{-p}$, c'est-à-dire $n \geq 10^p$.

THÉORÈME 2.5 ★ Séries géométriques

Soit $z \in \mathbb{C}$. La série $\sum z^n$ s'appelle une *série géométrique* de raison z .

1. La série $\sum z^n$ converge si et seulement si $|z| < 1$.
2. On connaît explicitement les sommes partielles, la somme et le reste d'une série géométrique :

$$S_n = \sum_{k=0}^n z^k = \begin{cases} \frac{1 - z^{n+1}}{1 - z} & \text{si } z \neq 1 \\ n + 1 & \text{si } z = 1 \end{cases}$$

Si $|z| < 1$,

$$\sum_{n=0}^{+\infty} z^n = \frac{1}{1 - z} \quad R_n = \sum_{k=n+1}^{+\infty} z^k = \frac{z^{n+1}}{1 - z}$$

Démonstration

1. On suppose que $\sum z^n$ est convergente. On note S_n La nième somme partielle associée à cette série, on a :

$$S_n = \sum_{k=0}^n z^k = \begin{cases} \frac{1-z^{n+1}}{1-z} & \text{si } z \neq 1 \\ n+1 & \text{si } z = 1 \end{cases}.$$

Alors $\sum z^n$ converge si et seulement si $(S_n)_{n \in \mathbb{N}}$ converge c'est-à-dire si et seulement si $(z^n)_{n \in \mathbb{N}}$ converge, ce qui est équivalent à $|z| < 1$.

2. Si $|z| < 1$, alors

$$\sum_{n=0}^{+\infty} z^n = \lim S_n = \frac{1}{1-z}.$$

On en tire que, pour tout $n \in \mathbb{N}$:

$$R_n = S - S_n = \frac{z^{n+1}}{1-z}.$$

Remarque 2.10 Les séries géométriques sont d'un usage fondamental en Analyse. Les formules précédentes sont à connaître par coeur.

2.2 Séries à termes positifs

2.2.1 Convergence des séries à termes positifs

Dans cette section, on considère une suite $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$ à termes positifs ou nuls. Si tous les termes de (u_n) sont négatifs, puis les séries $\sum u_n$ et $\sum (-u_n)$ sont de même nature, on se ramène au cas d'une série à termes positifs.

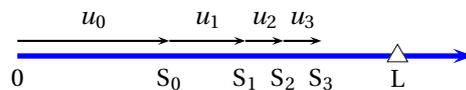


FIGURE 2.1 – Série à termes positifs

THÉORÈME 2.6 ★ Convergence d'une série à termes positifs

On suppose que $\forall n \in \mathbb{N}, u_n \geq 0$. Alors :

1. La suite des sommes partielles $(S_n)_{n \in \mathbb{N}}$ est croissante.
2. la série $\sum u_n$ converge si et seulement si la suite $(S_n)_{n \in \mathbb{N}}$ est majorée.

Démonstration

a. Soit $n \in \mathbb{N}$,

$$S_{n+1} - S_n = u_{n+1} \geq 0$$

ce qui montre que la suite (S_n) est croissante.

1. C'est le théorème de la limite monotone.

Remarque 2.11 Dans ce cas, $\sum_{n=0}^{+\infty} u_n = \sup_{n \in \mathbb{N}} S_n$ et pour tout $n \in \mathbb{N}$, $S_n \leq \sum_{n=0}^{+\infty} u_n = \sup_{n \in \mathbb{N}} S_n$.

Exemple 2.2

1. Montrer que $\forall n \geq 2, \frac{1}{n^2} \leq \frac{1}{n(n-1)}$.
2. En déduire que la série $\sum \frac{1}{n^2}$ converge.

Solution :

1. Cette inégalité est triviale.
2. On remarque que

$$\frac{1}{n(n-1)} = \frac{1}{n-1} - \frac{1}{n}$$

donc par un télescopage

$$\sum_{k=1}^n \frac{1}{k^2} \leq 1 + \sum_{k=2}^n \left(\frac{1}{k-1} - \frac{1}{k} \right) = 2 - \frac{1}{n+1} \leq 2$$

donc les sommes partielles S_n de $\sum 1/n^2$ sont croissantes et majorées. Alors la série $\sum 1/n^2$ converge.

2.2.2 Critères de comparaison

THÉORÈME 2.7 ★ Critère d'inégalité des séries positives

Soient $\sum u_n$ et $\sum v_n$ deux séries.

- (H1) Les deux séries sont à termes positifs : $\forall n \in \mathbb{N}, u_n \geq 0$ et $v_n \geq 0$.
- (H2) $\forall n \in \mathbb{N}, u_n \leq v_n$.

Alors :

1. Si la série $\sum v_n$ converge, alors la série $\sum u_n$ converge également et $\sum_{n=0}^{+\infty} u_n \leq \sum_{n=0}^{+\infty} v_n$.
2. Si la série $\sum u_n$ diverge, alors la série $\sum v_n$ diverge également.

Démonstration Considérons les sommes partielles de ces séries :

$$S_n = \sum_{k=0}^n u_k \quad V_n = \sum_{k=0}^n v_k$$

D'après l'hypothèse, pour tout $n \in \mathbb{N}$,

$$S_n \leq V_n$$

1. Si $\sum v_n$ converge, d'après le théorème 2.6, pour tout $n \in \mathbb{N}$,

$$S_n \leq V_n \leq \sum_{n=0}^{+\infty} v_n$$

La suite (S_n) étant majorée et croissante, la série à termes positifs $\sum u_n$ converge d'après le théorème de la limite monotone.

2. Puisque pour tout $n \in \mathbb{N}, V_n \geq S_n$ et que $S_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} +\infty$, alors $V_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} +\infty$ et donc la série $\sum v_n$ est divergente.

Exemple 2.3 Étudions la convergence de $\sum \frac{\ln n}{n2^n}$. La série est bien à termes positifs. La suite $\left(\frac{\ln n}{n}\right)$ tend vers 0 en l'infini donc il existe $M > 0$ tel que : $\forall n \in \mathbb{N}^*, 0 \leq \frac{\ln n}{n2^n} \leq \frac{M}{2^n}$ et la série de terme général $\frac{M}{2^n}$ étant convergente, il en est de même de la série initiale.

2.2.3 Comparaison avec une intégrale

THÉORÈME 2.8 ★ Comparaison avec une intégrale

Soit $f : [a, +\infty[\rightarrow \mathbb{R}$ une fonction continue par morceaux ($a \in \mathbb{N}$). On suppose que :

- (H1) f est à valeurs positives.
- (H2) f est décroissante.

Alors la série $\sum f(n)$ et la suite $(\int_a^n f(t) dt)$ sont de même nature. De plus, si elles convergent :

$$\int_{a+1}^{+\infty} f(t) dt \leq \sum_{k=a+1}^{+\infty} f(k) \leq \int_a^{+\infty} f(t) dt$$

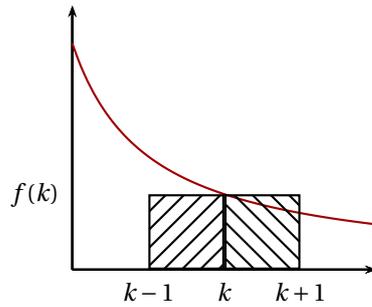


FIGURE 2.2 – $\int_k^{k+1} f(t) dt \leq f(k) \leq \int_{k-1}^k f(t) dt$

Démonstration

On effectue la démonstration dans le cas où $a = 0$. Comme f est décroissante, il vient

$$\forall x \in [n, n+1], \quad f(n+1) \leq f(x) \leq f(n)$$

et en passant à l'intégrale, on obtient :

$$f(n+1) \leq \int_n^{n+1} f(t) dt \leq f(n)$$

donc les séries positives de termes généraux $f(n)$ et $\int_n^{n+1} f(t) dt$ sont de même nature d'après le théorème de comparaison.

Remarque 2.12 On utilise en général ce théorème avec $a = 0$ ou $a = 1$.

Remarque 2.13 Si f est positive et continue sur $[a, +\infty[$, alors on montre facilement que la fonction F définie pour tout $x \geq a$ par $F(x) = \int_a^x f(t) dt$ est croissante. En effet, pour tout $y > x \geq a$, $F(y) - F(x) = \int_x^y f(t) dt \geq 0$. Le théorème de la limite monotone permet alors d'affirmer que soit F converge vers une limite finie en $+\infty$ (si F est bornée), soit F admet une limite infinie en $+\infty$ (si F n'est pas bornée).

On note (u_n) la suite de terme général $u_n = \int_a^n f(t) dt$. On a alors équivalence entre :

- F est bornée ;
- (u_n) est bornée.

En effet, si F est bornée alors $(u_n) = (F(n))$ aussi. Réciproquement, si (u_n) est bornée alors il existe $M \in \mathbb{R}$ tel que $u_n \leq M$ pour tout $n \geq a$ et pour $x \geq a$, on a $F(x) \leq F(\lfloor x \rfloor + 1) \leq M$ car F est croissante. Donc F est bornée.

On montre ainsi que $(\int_a^n f(t) dt)$ et F sont de même nature en $+\infty$.

Prenant un peu d'avance avec le chapitre ??, on dit qu'une intégrale de la forme $\int_a^x f(t) dt$ qui admet une limite quand $x \rightarrow \infty$ est une *intégrale convergente* (et divergente sinon).

Le théorème précédent peut alors se reformuler sous la forme compacte suivante.

THÉORÈME 2.9 ★ Comparaison avec une intégrale
 Soit $f : [a, +\infty[\rightarrow \mathbb{R}$ une fonction continue par morceaux ($a \in \mathbb{N}$). On suppose que :

- (H1) f est à valeurs positives.
- (H2) f est décroissante.

Alors la série $\sum f(n)$ et l'intégrale $\int_a^{+\infty} f(t) dt$ sont de même nature. De plus, si elles convergent :

$$\forall n \in \mathbb{N}, \quad \int_{n+1}^{+\infty} f(t) dt \leq \sum_{k=n+1}^{+\infty} f(k) \leq \int_n^{+\infty} f(t) dt$$

Remarque 2.14 La comparaison série/intégrale est un outil très classique et est en général utilisée pour obtenir des résultats asymptotiques avec des séries. On propose un exemple très classique avec la série harmonique qu'il faut complètement maîtriser.

Exemple 2.4 Pour tout $n \in \mathbb{N}$, on note $H_n = \sum_{k=1}^n \frac{1}{k}$ la nième somme partielle de la série harmonique. Montrons que $H_n \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \ln n$.

Comme $f : t \mapsto \frac{1}{t}$ est décroissante, positive et continue sur \mathbb{R}_+^* , pour tout $k \geq 2$, on a :

$$\int_k^{k+1} f(t) dt \leq \frac{1}{k} \leq \int_{k-1}^k f(t) dt$$

ce qui amène pour tout $n \geq 2$:

$$\sum_{k=2}^n \int_k^{k+1} f(t) dt \leq \sum_{k=2}^n \frac{2}{k} \leq \sum_{k=2}^n \int_{k-1}^k f(t) dt.$$

Par la relation de Chasles, on calcule alors que :

$$1 + \int_2^{n+1} f(t) dt \leq H_n \leq 1 + \int_1^n f(t) dt.$$

On obtient $1 + \ln(n+1) - \ln 2 \leq H_n \leq 1 + \ln(n)$ ce qui s'écrit aussi

$$1 + \frac{1 - \ln 2 + \ln(1 + \frac{1}{n})}{\ln n} \leq \frac{H_n}{\ln n} \leq 1 + \frac{1}{\ln n}$$

et donc $H_n \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \ln n$.

THÉORÈME 2.10 ★★★ Comparaison avec une intégrale, version avec contrôle de l'erreur **Hors programme en PC**

Soit $f : [a, +\infty[\rightarrow \mathbb{R}$ une fonction continue par morceaux ($a \in \mathbb{N}$). On suppose que :

- (H1) f est à valeurs positives.
- (H2) f est décroissante.

On note pour $n \geq a+1$,

$$w_n = \int_{n-1}^n f(t) dt - f(n)$$

Alors :

1. La série $\sum w_n$ est convergente.
2. La série $\sum f(n)$ converge si et seulement si la fonction f est intégrable sur $[a, +\infty[$. Dans ce cas :

$$\sum_{n=a}^{+\infty} w_n = \int_a^{+\infty} f(t) dt - \sum_{n=a}^{+\infty} f(n).$$

Démonstration En interprétant $f(n)$ comme l'aire de deux rectangles (voir la figure 2.2), et puisque la fonction f est décroissante, on a l'encadrement :

$$\int_{n+1}^n f(t) dt \leq f(n) \leq \int_{n-1}^n f(t) dt$$

d'où l'on tire que

$$0 \leq w_n \leq \int_{n-1}^n f(t) dt - \int_n^{n+1} f(t) dt$$

et donc en notant $W_n = \sum_{k=a+1}^n w_k$ et $u_k = \int_k^{k+1} f(t) dt$,

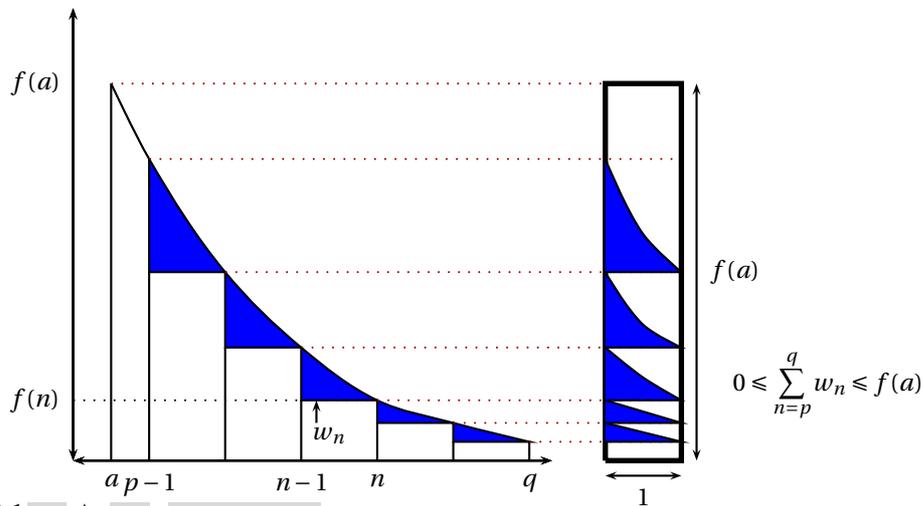
$$0 \leq W_n \leq \sum_{k=a+1}^n [u_{k-1} - u_k] = u_a - u_n = \int_a^{a+1} f(t) dt - \int_n^{n+1} f(t) dt \leq \int_a^{a+1} f(t) dt$$

La suite des sommes partielles est donc majorée et alors la série $\sum w_n$ converge.

Ensuite, pour $n \geq a+1$,

$$\sum_{k=a+1}^n f(k) = \int_a^n f(t) dt - \sum_{k=a+1}^n w_k$$

Puisque la série $\sum w_k$ converge, la série $\sum f(k)$ converge si et seulement si la suite de terme général $\int_a^n f(t) dt$ possède une limite lorsque $n \rightarrow +\infty$, c'est-à-dire si et seulement si la fonction f est intégrable sur $[a, +\infty[$.



Exercice 2.1 ★

Montrer qu'il existe un réel γ (constante d'Euler) tel que

$$H_n = \sum_{k=1}^n \frac{1}{k} = \ln n + \gamma + o(1)$$

Solution : Considérons la fonction $f : \begin{cases} [1, +\infty[& \rightarrow & \mathbb{R} \\ t & \mapsto & \frac{1}{t} \end{cases}$. Elle est continue, positive et décroissante sur l'intervalle $[1, +\infty[$. On sait alors, par le théorème de comparaison série-intégrale, que la série de terme général

$$w_n = \int_{n-1}^n \frac{dt}{t} - \frac{1}{n} \quad (n \geq 2)$$

est convergente. Donc il existe un réel $L \in \mathbb{R}$ tel que $W_n = \sum_{k=2}^n w_k \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} L$. Calculons la somme partielle :

$$W_n = \sum_{k=2}^n w_k = \int_1^n \frac{dt}{t} - \sum_{k=2}^n \frac{1}{k} = \ln n - \sum_{k=2}^n \frac{1}{k}$$

Alors $\forall n \geq 1$,

$$\sum_{k=1}^n \frac{1}{k} - \ln n = 1 - W_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} 1 - L$$

Il suffit de poser $\gamma = 1 - L$.

Exemple 2.5 Étudions la nature de la série $\sum \frac{1}{n(\ln n)^\beta}$ où $\beta > 0$.

Solution : Considérons la fonction $f : \begin{cases} [2, +\infty[& \rightarrow & \mathbb{R} \\ t & \mapsto & \frac{1}{t(\ln t)^\beta} \end{cases}$. Elle est continue, positive et décroissante sur l'intervalle $[2, +\infty[$. D'après le théorème de comparaison série-intégrale, la série $\sum f(n)$ converge si et seulement si la fonction f est intégrable sur $[2, +\infty[$. Mais on calcule pour $x \geq 2$,

$$F(x) = \int_2^x \frac{(\ln t)^{-\beta}}{t} dt = \begin{cases} \left[\frac{(\ln t)^{-\beta+1}}{-\beta+1} \right]_2^x = \frac{(\ln x)^{-\beta+1} - (\ln 2)^{-\beta+1}}{1-\beta} & \text{si } \beta \neq 1 \\ [\ln(\ln t)]_2^x = \ln(\ln(x)) - \ln(\ln(2)) & \text{si } \beta = 1 \end{cases}$$

Par conséquent, la fonction f est intégrable si et seulement si $1 - \beta < 0$ c'est-à-dire $\beta > 1$.

Remarque 2.15 Lorsque la fonction f est *croissante*, on obtient également un encadrement de $f(n)$ par deux intégrales qui peut être intéressant comme le montre l'exercice suivant.

Exemple 2.6 Montrer que $\ln(n!) \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} n \ln n$.

$$\ln(n!) = \sum_{k=2}^n \ln(k)$$

Introduisons la fonction

$$f : \begin{cases} [1, +\infty[& \rightarrow & \mathbb{R} \\ t & \mapsto & \ln t \end{cases}$$

Elle est *croissante* et positive sur $[1, +\infty[$. Soit $k \geq 2$, on dispose de l'encadrement :

$$\int_{k-1}^k \ln(t) dt \leq \ln k \leq \int_k^{k+1} \ln(t) dt$$

En sommant, on en déduit l'encadrement :

$$\int_1^n \ln(t) dt \leq \ln(n!) \leq \int_1^n \ln(t) dt + \ln n - \int_1^2 \ln(t) dt$$

Et puisque $\int_1^n \ln(t) dt = n \ln(n) - n$, en divisant par $n \ln n$, on trouve que

$$1 \leq \frac{\ln(n!)}{n \ln n} \leq 1 + \frac{1}{n} - \frac{C}{n \ln n}$$

et en utilisant le théorème des gendarmes, on obtient que $\frac{\ln(n!)}{n \ln n} \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} 1$.

Un application essentielle de ce théorème est le suivant.

THÉORÈME 2.11 ★ Séries de Riemann

Soit $\alpha \in \mathbb{R}$. On appelle *série de Riemann* la série

$$\sum_{n \geq 1} \frac{1}{n^\alpha}$$

- Si $\alpha > 1$, la série de Riemann converge.
- Si $\alpha \leq 1$, la série de Riemann diverge.

Démonstration

- Le cas $\alpha = 1$ correspond à la série harmonique dont on a déjà prouvé la divergence. On suppose dans la suite que $\alpha \neq 1$.
- Si $\alpha \leq 0$ alors la suite (u_n) ne converge pas vers 0 et donc $\sum u_n$ est grossièrement divergente.
- Si $\alpha > 0$ et $\alpha \neq 1$, introduisons $f : t \mapsto 1/t^\alpha$ et considérons (u_n) la suite de terme général $u_n = \int_1^n f(t) dt$ qui est bien définie car f est continue sur $[1, n]$. De plus f est continue, positive et décroissante sur $[1, +\infty[$. Par théorème de comparaison série-intégrale, on sait alors que la série $\sum u_n$ et la suite $(\int_1^n f(t) dt)$ sont de même nature.

Pour $n \geq 1$, on calcule que

$$u_n = \left[\frac{1}{1-\alpha} \frac{1}{t^{\alpha-1}} \right]_1^n = \frac{1}{1-\alpha} \left(\frac{1}{n^{\alpha-1}} - 1 \right)$$

qui est bien définie car $\alpha \neq 1$.

De plus, on obtient ainsi le terme général d'une suite convergente si $\alpha > 1$ et divergente si $\alpha < 1$, d'où le théorème.

Exemple 2.7

- Montrons la convergence de la série $\sum_{n \geq 1} \frac{1}{n^2+1}$. Pour tout $n \geq 1$, $\frac{1}{n^2+1} \leq \frac{1}{n^2}$. Les deux séries $\sum_{n \geq 1} \frac{1}{n^2+1}$ et $\sum_{n \geq 1} \frac{1}{n^2}$ sont à termes positifs et par comparaison à une série de Riemann, cette dernière converge donc $\sum_{n \geq 1} \frac{1}{n^2+1}$ converge.
- La série $\sum_{n \geq 1} \frac{n+1}{n\sqrt{n}}$ diverge. En effet, pour tout $n \geq 1$, $\frac{n+1}{n\sqrt{n}} \geq \frac{n}{n\sqrt{n}} = \frac{1}{\sqrt{n}}$. Les deux séries $\sum_{n \geq 1} \frac{n+1}{n\sqrt{n}}$ et $\sum_{n \geq 1} \frac{1}{\sqrt{n}}$ sont à termes positifs et cette dernière est de Riemann et divergente donc $\sum_{n \geq 1} \frac{n+1}{n\sqrt{n}}$ diverge.

2.2.4 Encore des critères de comparaison

COROLLAIRE 2.12 ★ Critère de domination des séries positives

Soient $\sum u_n$ et $\sum v_n$ deux séries. On suppose que :

- (H1) les séries sont à termes positifs : $\forall n \in \mathbb{N}, u_n \geq 0$ et $v_n \geq 0$.
- (H2) $u_n = \underset{n \rightarrow +\infty}{O}(v_n)$ (ou $u_n = \underset{n \rightarrow +\infty}{o}(v_n)$)

Alors :

- si $\sum v_n$ converge, la série $\sum u_n$ converge également.
- si $\sum u_n$ diverge, la série $\sum v_n$ diverge également.

Démonstration Si $u_n = \underset{n \rightarrow +\infty}{O}(v_n)$, il existe $C > 0$ et $n_0 \in \mathbb{N}$ tel que : $\forall n \geq n_0, u_n \leq Cv_n$.

On ne change pas la nature d'une série en modifiant un nombre fini de ses termes donc on peut supposer que pour tout $n \in \mathbb{N}$, on a $u_n \leq Cv_n$.

Si $\sum v_n$ est convergente, alors il en est de même de $\sum Cv_n$ et par critère d'inégalité sur séries à terme général positif, on sait que $\sum u_n$ est convergente.

De la même façon, on montre que si $\sum u_n$ est divergente, alors $\sum Cv_n$ est aussi divergente, ce qui implique la divergence de $\sum v_n$.

Enfin, si $u_n = \underset{n \rightarrow +\infty}{o}(v_n)$, alors $u_n = \underset{n \rightarrow +\infty}{O}(v_n)$ et donc si $\sum v_n$ converge, $\sum u_n$ converge aussi.

Dans la pratique, on utilise souvent la règle suivante qui découle directement du corollaire précédent.

THÉORÈME 2.13 ★ Règle $n^\alpha u_n$

On considère une série $\sum u_n$. On suppose que :

- (H1) La série est à termes positifs : $\forall n \in \mathbb{N}, u_n \geq 0$.
- (H2) Il existe $\alpha > 1$ tel que $u_n = \underset{n \rightarrow +\infty}{o}\left(\frac{1}{n^\alpha}\right)$, c'est-à-dire $n^\alpha u_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} 0$.

Alors la série $\sum u_n$ est convergente.

Si par contre :

- (H1) La série est à termes positifs : $\forall n \in \mathbb{N}, u_n \geq 0$.
- (H2) Il existe $\beta \leq 1$ tel que $\frac{1}{n^\beta} = \underset{n \rightarrow +\infty}{o}(u_n)$, c'est-à-dire $n^\beta u_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} +\infty$.

Alors la série $\sum u_n$ est divergente.

Exemple 2.8 Montrons que la série $\sum \frac{n^3}{2^n}$ converge. Par croissances comparées entre suites usuelles, on sait que $\frac{n^5}{2^n} \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} 0$, c'est-à-dire que $\frac{n^3}{2^n} = \underset{n \rightarrow +\infty}{o}\left(\frac{1}{n^2}\right)$. Les séries $\sum \frac{n^3}{2^n}$ et $\sum \frac{1}{2^n}$ sont à termes positifs. La seconde converge donc la première aussi.

THÉORÈME 2.14 ★ Critère d'équivalence des séries positives

Soient deux séries $\sum u_n$ et $\sum v_n$. On suppose que :

- (H1) $u_n \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} v_n$.
- (H2) À partir d'un certain rang, $v_n \geq 0$.

Alors à partir d'un certain rang, $u_n \geq 0$ et les séries $\sum u_n$ et $\sum v_n$ sont de même nature.

Démonstration Puisque $u_n \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} v_n$, il existe un rang $N \in \mathbb{N}$ tel que pour tout $n \in \mathbb{N}$, si $n \geq N$ alors :

$$\frac{1}{2}v_n \leq u_n \leq \frac{3}{2}v_n.$$

Donc $u_n = \underset{n \rightarrow +\infty}{O}(v_n)$ et $v_n = \underset{n \rightarrow +\infty}{O}(u_n)$. D'après les hypothèses, il existe un rang $N' \in \mathbb{N}$ tel que pour tout $n \geq N'$, $v_n \geq 0$. Alors pour tout $n \geq N'$, $u_n \geq \frac{1}{2}v_n \geq 0$ et on utilise alors le critère de domination pour les séries à terme général positif.

PLAN 2.1 : Plan d'étude d'une série $\sum u_n$ à termes positifs

1. Chercher un équivalent simple (v_n) de la suite (u_n) (on peut utiliser les développements limités).
2. L'équivalent permet de déduire le signe de u_n à partir d'un certain rang.
3. Vérifier que la série $\sum v_n$ est à termes positifs à partir d'un certain rang.
4. Utiliser les séries de référence (séries de Riemann, séries géométriques) ou la règle $n^\alpha v_n$ pour trouver la nature de la série $\sum v_n$.
5. Les séries $\sum u_n$ et $\sum v_n$ sont de même nature.

Exemple 2.9 Étudions la nature de la série $\sum \frac{\ln\left(1 + \frac{1}{n^2\sqrt{n}}\right)}{\sin(1/n)}$.

Puisque $u_n \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \frac{1}{n^{3/2}}$ et que (u_n) est positive, la série converge.

2.2.5 Comparaison logarithmique

THÉORÈME 2.15 ★ Comparaison logarithmique

On considère deux séries $\sum u_n$ et $\sum v_n$. On suppose que :

(H1) $\forall n \geq n_0, u_n > 0$ et $v_n > 0$.

(H2) $\forall n \geq n_0, \frac{u_{n+1}}{u_n} \leq \frac{v_{n+1}}{v_n}$.

Alors :

1. $u_n = O_{n \rightarrow +\infty}(v_n)$
2. Si $\sum v_n$ converge, alors $\sum u_n$ converge.
3. Si $\sum u_n$ diverge, alors $\sum v_n$ diverge.

Démonstration Pour $n \geq n_0$,

$$\frac{u_{n+1}}{v_{n+1}} \leq \frac{u_n}{v_n}$$

Par conséquent, la suite $\left(\frac{u_n}{v_n}\right)$ est décroissante. Donc pour tout $n \geq n_0$,

$$\frac{u_n}{v_n} \leq \frac{u_{n_0}}{v_{n_0}} = C \text{ donc } u_n \leq C v_n$$

par positivité de (u_n) et de (v_n) On conclut grâce aux critères de comparaison.

COROLLAIRE 2.16 ★ Critère de d'Alembert

Soit une série $\sum u_n$ à termes strictement positifs.

1. S'il existe un rang $n_0 \in \mathbb{N}$ tel que $\forall n \geq n_0, \frac{u_{n+1}}{u_n} \geq 1$, alors la série $\sum u_n$ diverge.
2. S'il existe un rang $n_0 \in \mathbb{N}$ et une constante $k < 1$ telle que $\forall n \geq n_0, \frac{u_{n+1}}{u_n} \leq k$, alors la série $\sum u_n$ converge.

Démonstration

1. Puisque pour tout $n \geq n_0, u_n \geq u_{n_0} > 0$, la suite (u_n) ne converge pas vers 0. La série $\sum u_n$ diverge grossièrement.
2. On utilise le critère de comparaison logarithmique avec une suite géométrique : $v_n = k^n$. En effet,

$$\forall n \geq n_0, \frac{u_{n+1}}{u_n} \leq k = \frac{v_{n+1}}{v_n}$$

et puisque $0 \leq k < 1$, la série géométrique $\sum v_n$ converge.

Remarque 2.16 En pratique, on utilise plutôt la règle de d'Alembert suivante :

THÉORÈME 2.17 ★ Règle de d'Alembert

Soit une série $\sum u_n$. On suppose que :

(H1) $\exists n_0 \in \mathbb{N} : \forall n \geq n_0, u_n > 0.$

(H2) $\frac{u_{n+1}}{u_n} \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} k \in \overline{\mathbb{R}}_+ (= [0, +\infty]).$

Alors

1. Si $0 \leq k < 1$, la série $\sum u_n$ converge.
2. Si $k > 1$, la série $\sum u_n$ diverge.
3. Si $k = 1$, on ne peut rien dire en général.

Démonstration

1. Si $0 \leq k < 1$, en posant $k' = \frac{1+k}{2}$, on a $k < k' < 1$. Puisque $\frac{u_{n+1}}{u_n}$ converge vers k , il existe un rang $n_1 \geq n_0$ tel que $\forall n \geq n_1, \frac{u_{n+1}}{u_n} \leq k'$. Puisque $k' < 1$, en utilisant le corollaire précédent, la série $\sum u_n$ converge.
2. Si $k > 1$, en posant $k' = \frac{1+k}{2}$, on a $1 < k' < k$. Puisque $\frac{u_{n+1}}{u_n} \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} k$, il existe un rang $n_1 \geq n_0$ tel que $\forall n \geq n_1, \frac{u_{n+1}}{u_n} \geq k'$. Comme $k' > 1$, d'après le corollaire précédent, la série $\sum u_n$ diverge.

Remarque 2.17 Dans le cas où $k = 1$, on ne peut rien dire comme le montrent les exemples suivants :

- $u_n = \frac{1}{n}, \frac{u_{n+1}}{u_n} \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} 1$ et $\sum u_n$ diverge.
- $u_n = \frac{1}{n^2}, \frac{u_{n+1}}{u_n} \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} 1$ et $\sum u_n$ converge.

Remarque 2.18 La règle de d'Alembert est indiquée pour étudier la nature d'une série $\sum u_n$ lorsque le terme général u_n est un produit (factorielles, ...). Dans ce cas, $\frac{u_{n+1}}{u_n}$ est souvent simple.

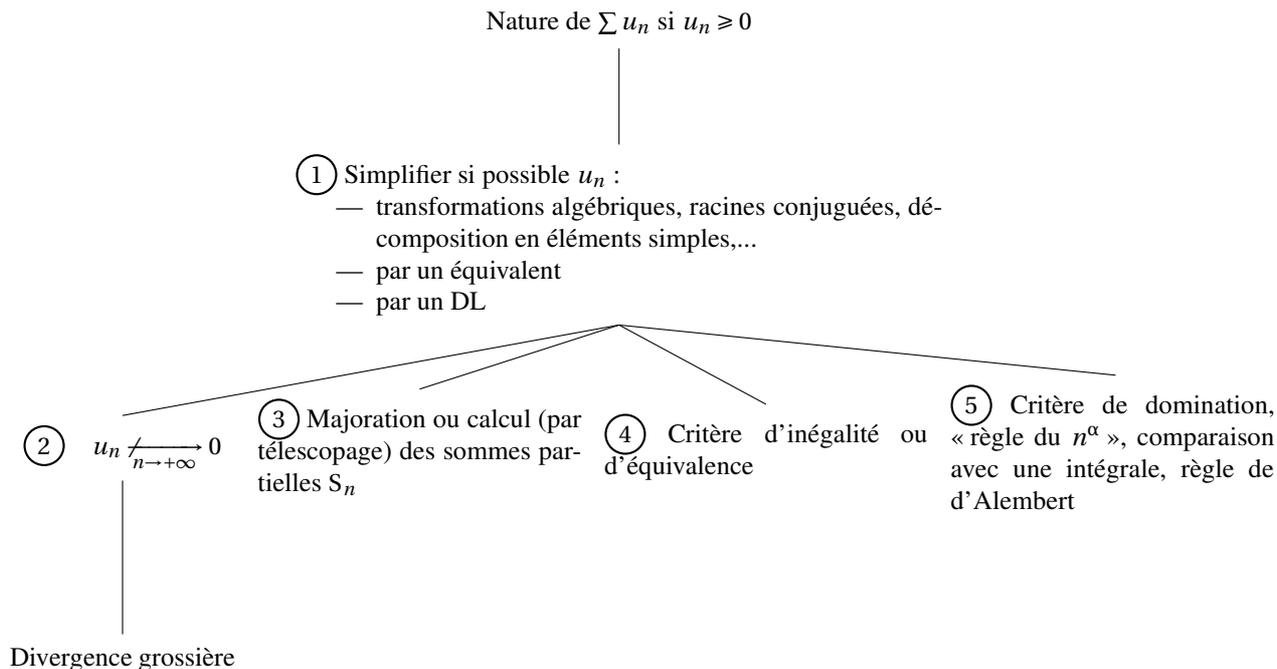
Exemple 2.10

- Pour $x > 0$, étudions la nature de la série $\sum \frac{n!}{(2n)!} x^n$. La série est à termes positifs et $\frac{u_{n+1}}{u_n} = \frac{n+1}{(2n+2)(2n+1)} x \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \frac{x}{4n} \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} 0$ donc, d'après la règle de d'Alembert, la série converge.
- Pour $x > 0$ et $\alpha \in \mathbb{R}$, étudions la nature de la série $\sum n^\alpha x^n$. On a $\frac{u_{n+1}}{u_n} = \left(\frac{n+1}{n}\right)^\alpha x = \left(1 + \frac{1}{n}\right)^\alpha x \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} x$. Donc, d'après la règle de d'Alembert, la série converge si $x < 1$ et diverge si $x > 1$. Si $x = 1$, la série converge d'après le critère de Riemann si et seulement si $\alpha < -1$.

Remarque 2.19 La règle de d'Alembert n'est pas une panacée !

- Si la suite (a_n) s'annule une infinité de fois, ne pas chercher à utiliser d'Alembert.
- La réciproque est fautive : il existe des séries $\sum a_n$ à termes strictement positifs tels que la série $\sum a_n$ converge avec $\frac{a_{n+1}}{a_n}$ qui n'a pas de limite.

2.2.6 Plan d'étude d'une série à terme général positif



2.3 Séries à termes non nécessairement positifs

2.3.1 Absolue convergence

DÉFINITION 2.3 ★ Série absolument convergente

Soit $(u_n) \in \mathbb{C}^{\mathbb{N}}$ une suite complexe (ou réelle). On dit que la série $\sum u_n$ est *absolument convergente* si et seulement si la série à termes positifs $\sum |u_n|$ converge.

THÉORÈME 2.18 ★ Une série absolument convergente est convergente

Soit $(u_n) \in \mathbb{C}^{\mathbb{N}}$ une suite complexe (ou réelle). Si la série $\sum |u_n|$ converge, alors la série $\sum u_n$ est convergente.

Démonstration Si (u_n) est complexe alors en utilisant les inégalités $|\operatorname{Re}(u_n)| \leq |u_n|$ et $|\operatorname{Im}(u_n)| \leq |u_n|$, on se ramène à une série réelle. On suppose dorénavant que (u_n) est réelle. On note $u_n^+ = \max(u_n, 0)$ et $u_n^- = \max(-u_n, 0)$. On remarque que $u_n^+ \leq |u_n|$ et $u_n^- \leq |u_n|$. Par ailleurs les deux séries $\sum u_n^+$ et $\sum u_n^-$ sont toutes deux à termes positifs donc elles convergent d'après le critère de comparaison des séries à termes positifs. Comme $u_n = u_n^+ - u_n^-$, on en déduit par linéarité que $\sum u_n$ converge.

Remarque 2.20 Il se peut que la série $\sum u_n$ converge sans que la série $\sum |u_n|$ converge. On dit alors que la série $\sum u_n$ est *semi-convergente*.

Exemple 2.11

- On montrera dans la section 2.3.2 que la série $\sum \frac{(-1)^n}{n}$ est semi-convergente.
- La série $\sum \frac{(-1)^n}{n\sqrt{n}}$ est absolument convergente.

PROPOSITION 2.19 ★ Inégalité triangulaire

Si $\sum u_n$ est une série absolument convergente alors pour tout $N \in \mathbb{N}$,

$$\left| \sum_{n=N}^{+\infty} u_n \right| \leq \sum_{n=N}^{+\infty} |u_n|.$$

Démonstration Comme $\sum u_n$ est absolument convergente, les séries $\sum |u_n|$ et $\sum u_n$ sont convergentes, ce qui implique pour tout $N \in \mathbb{N}$ la convergence des séries $\sum_{n \geq N} |u_n|$ et $\sum_{n \geq N} u_n$. L'inégalité triangulaire amène pour tout $M \geq N$, $\left| \sum_{n=N}^M u_n \right| \leq \sum_{n=N}^M |u_n|$ d'où l'inégalité en passant à la limite quand $M \rightarrow +\infty$.

2.3.2 Séries alternées

DÉFINITION 2.4 ★ Série alternée

On appelle *série alternée* une série $\sum (-1)^n u_n$ où (u_n) est une suite à termes positifs.

THÉORÈME 2.20 ★ Critère spécial des séries alternées (TSA)

On considère une série $\sum \underbrace{(-1)^n v_n}_{u_n}$.

- (H1) À partir d'un certain rang $v_n \geq 0$.
- (H2) La suite (v_n) est *décroissante* à partir d'un certain rang.
- (H3) $v_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} 0$

Alors :

1. la série alternée $\sum (-1)^n v_n$ converge ;
2. On dispose d'une majoration du reste $R_n = \sum_{k=n+1}^{+\infty} (-1)^k v_k$ par la valeur absolue du premier terme négligé $|u_{n+1}|$:

$$|R_n| \leq v_{n+1}$$

3. Le signe du reste R_n est le même que celui du premier terme négligé : $\text{sg}(R_n) = \text{sg}(u_{n+1})$.

Démonstration On étudie la suite partielle (S_n) et on montre que les deux suites extraites (S_{2n}) et (S_{2n+1}) sont adjacentes. En effet, pour tout $n \in \mathbb{N}$, $S_{2n} = \sum_{k=0}^{2n} (-1)^k v_k$ et

$$S_{2n+2} - S_{2n} = v_{2n+2} - v_{2n+1} < 0$$

car (v_n) est décroissante donc (S_{2n}) est décroissante. De même, $S_{2n+1} = \sum_{k=0}^{2n+1} (-1)^k v_k$ et

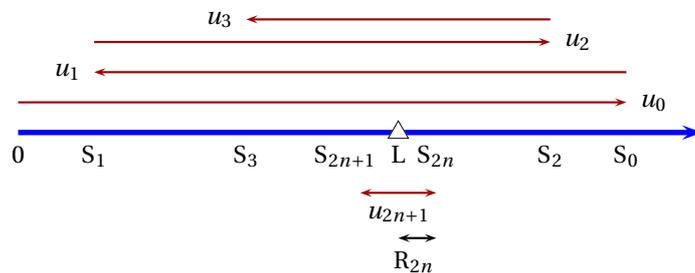
$$S_{2n+3} - S_{2n+1} = -v_{2n+3} + v_{2n+2} > 0$$

donc (S_{2n+1}) est croissante. Enfin, $S_{2n+1} - S_{2n} = v_{2n+1} \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} 0$ donc les deux suites sont bien adjacentes. Le théorème ?? page ?? nous assure alors du fait que (S_n) converge.

De plus, de $S_{2n+1} \leq S \leq S_{2n}$ donc $-v_{2n+1} = S_{2n+1} - S_{2n} \leq S - S_{2n} = R_{2n} \leq 0$ et $0 \leq R_{2n-1} = S - S_{2n-1} \leq S_{2n} - S_{2n-1} = v_{2n}$.

Remarque 2.21 Comme (S_{2n}) est décroissante, que (S_{2n+1}) est croissante et que pour tout $n \in \mathbb{N}$, $S_{2n+1} \leq S \leq S_{2n}$, on a les inégalités sur les sommes partielles :

$$S_1 \leq S_3 \leq \dots \leq S_{2n+1} \leq \dots \leq S \leq \dots \leq S_{2n} \leq \dots \leq S_2 \leq S_0.$$



Remarque 2.22 Pour vérifier qu'une série $\sum (-1)^n u_n$ est alternée, le point souvent délicat consiste à montrer que la suite (u_n) est *décroissante* à partir d'un certain rang. Porter un soin particulier à cette vérification !

Exemple 2.12 On montre facilement en appliquant ce critère que $\sum \frac{(-1)^n}{n}$ est convergente.

Remarque 2.23 On veut déterminer le signe de la somme $S = \sum_{n=0}^{+\infty} (-1)^n u_n$ d'une série alternée :

- Si la série est alternée à partir du rang 0, le signe de la somme est celui de $S_0 = u_0$.
- Si la série est alternée à partir d'un rang n_0 , pour $n \geq n_0$, on a l'encadrement $S \in [S_n, S_{n+1}]$. En particulier, si $S_n \geq 0$, et $S_{n+1} \geq 0$, alors $S \geq 0$.

— À titre d'exemple, donnons les valeurs approchées des 20 premières sommes partielles de la série $\sum (-1)^n/n$:

1., .5000000000, .8333333333, .5833333333, .7833333333, .6166666667, .7595238095, .6345238095, .7456349206, .6456349206, .7365440115, .6532106782, .7301337551, .6587051837, .7253718504, .6628718504, .7216953798, .6661398242, .7187714032, .6687714032.

Cette série converge vers $\ln 2 \approx 0.6931471806$. On a bien à chaque fois $S \in [S_n, S_{n+1}]$.

Exemple 2.13 On veut calculer une valeur approchée de la somme d'une série alternée $\sum (-1)^n f(n)$ où f est une fonction décroissante positive qui tend vers 0. On prend comme valeur approchée de la somme $L = \sum_{n=0}^{+\infty} (-1)^n f(n)$, la

somme partielle $S_n = \sum_{k=0}^n (-1)^k f(k)$. On dispose de la majoration de l'erreur :

$$|S_n - L| = |R_n| \leq f(n+1)$$

On peut donc écrire la procédure Python suivante qui renvoie une valeur approchée à ϵ près de la somme :

```
def serie_alt(epsilon, f)
    S=0
    k=0
    sig=1
    while f(k+1)>epsilon:
        S+=sig*f(k)
        sig*=-1
        k+=1
    return(S)
```

PROPOSITION 2.21 ★★★★★ Séries de Riemann alternées

Considérons la série $\sum_{n \geq 1} \frac{(-1)^n}{n^\alpha}$.

- Si $\alpha > 1$, la série converge absolument.
- Si $0 < \alpha \leq 1$, la série est semi-convergente.
- Si $\alpha \leq 0$, la série diverge grossièrement.

Démonstration Séries de Riemann et critère des séries alternées.

11:58:07

Remarque 2.24 Une Technique très importante est celle dite d'éclatement des termes Étudions la nature des séries

$$\sum_{n \geq 1} \ln\left(1 + \frac{(-1)^n}{n}\right) \text{ et } \sum_{n \geq 1} \ln\left(1 + \frac{(-1)^n}{\sqrt{n}}\right).$$

Solution : Avec un DL,

$$u_n = \underbrace{\frac{(-1)^n}{n}}_{a_n} - \underbrace{\frac{1}{2n^2} + o_{n \rightarrow +\infty}\left(\frac{1}{n^2}\right)}_{b_n}$$

où $\sum a_n$ est une série alternée qui converge et $\sum v_n$ converge absolument. Donc $\sum u_n$ converge.

Remarque 2.25 La condition dans le théorème spécial portant sur la décroissance de (v_n) est essentielle, comme le montre l'exemple suivant.

Exemple 2.14 Nature de la série $\sum \frac{(-1)^n}{\sqrt{n} - (-1)^n}$

Solution :

— $v_{2p} = \frac{1}{\sqrt{2p-1}}$, $v_{2p+1} = \frac{1}{\sqrt{2p+1+1}}$ et $v_{2p+2} = \frac{1}{\sqrt{2p+2-1}}$ On vérifie que $v_{2p+1} \leq v_{2p}$ et $v_{2p+1} \leq v_{2p+2}$ donc que la suite (v_n) n'est pas décroissante.

On a $v_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} 0$ et $v_n \geq 0$, mais on ne peut pas appliquer la TSA. Utilisons l'« éclatement des termes » :

$$u_n = \frac{(-1)^n}{\sqrt{n}} \frac{1}{1 - \frac{(-1)^n}{\sqrt{n}}} = \frac{(-1)^n}{\sqrt{n}} + \underbrace{\frac{1}{n}}_{a_n} + \underbrace{o\left(\frac{1}{n}\right)}_{b_n}$$

Avec la série $\sum a_n$ qui est semi-convergente et la série $\sum b_n$ divergente. On en déduit que la série $\sum u_n$ diverge.

Remarque 2.26 Deux erreurs à ne pas commettre :

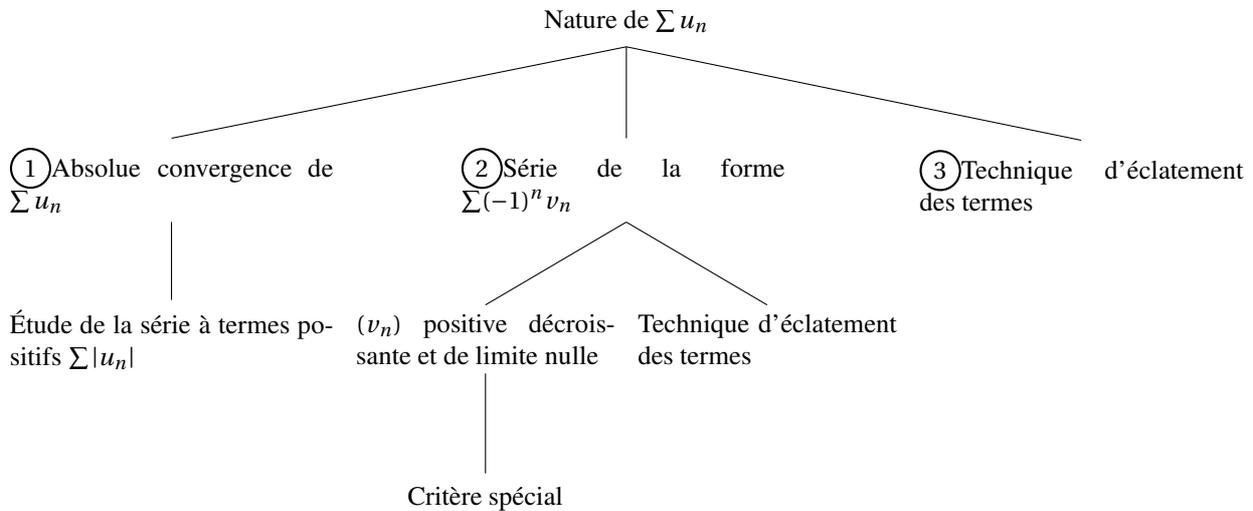
- si $u_n \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} v_n$ et si la série $\sum v_n$ est une série alternée convergente, la série $\sum u_n$ n'est pas forcément convergente ;
- si $u_n \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} (-1)^n v_n$ avec $v_n \geq 0$ et (v_n) décroissante, la suite $(|u_n|)$ n'est pas nécessairement décroissante.
- si $u_n = a_n + b_n + o_{n \rightarrow +\infty}(c_n)$ avec $\sum a_n, \sum b_n$ divergente et $\sum c_n$ convergente n'implique pas en général que $\sum u_n$ est divergente.

Utiliser la technique d'éclatement des termes. Faire un développement asymptotique de u_n à la précision un terme d'une série absolument convergente. Si par exemple

$$u_n = a_n + o_{n \rightarrow +\infty}\left(\frac{1}{n^\alpha}\right) \quad \alpha > 1$$

La nature de $\sum u_n$ est la même que celle de $\sum a_n$.

2.3.3 Plan d'étude d'une série à termes non nécessairement positifs



2.4 Formule de Stirling

LEMME 2.22 ★★★ Quelques résultats classiques concernant les intégrales de Wallis

Pour tout $n \in \mathbb{N}$, on considère l'intégrale de Wallis $I_n = \int_0^{\pi/2} \sin^n t dt$. On a alors :

1 La suite (I_n) est décroissante : $\forall n \in \mathbb{N}, I_{n+1} \leq I_n$;

2 $\forall n \in \mathbb{N}, I_{n+2} = \frac{n+1}{n+2} I_n$;

3 $\forall n \in \mathbb{N}, (n+1)I_{n+1}I_n = \frac{\pi}{2}$;

4 $\frac{I_n}{I_{n+1}} \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} 1$ autrement dit $I_n \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} I_{n+1}$;

5 $\forall n \in \mathbb{N}, I_{2n} = \frac{(2n)!}{2^{2n}(n!)^2} \frac{\pi}{2}$ et $I_{2n+1} = \frac{2^{2n}(n!)^2}{(2n+1)!}$.

Démonstration

THÉORÈME 2.23 ★★★ Formule de Stirling

$$n! \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \left(\frac{n}{e}\right)^n \sqrt{2\pi n}.$$

Démonstration Posons pour tout $n \in \mathbb{N}$,

$$u_n = \frac{n^n e^{-n} \sqrt{n}}{n!}$$

et étudions la nature de la série de terme général $v_n = \ln\left(\frac{u_{n+1}}{u_n}\right)$.

On a pour tout $n \in \mathbb{N}^*$,

$$\begin{aligned} v_n &= \ln \left[\left(\frac{n+1}{n}\right)^{n+\frac{1}{2}} e^{-1} \right] \\ &= -1 + \left(n + \frac{1}{2}\right) \ln\left(1 + \frac{1}{n}\right) \\ &= -1 + \left(n + \frac{1}{2}\right) \left(\frac{1}{n} - \frac{1}{2n^2} + \frac{1}{3n^3} + o\left(\frac{1}{n^3}\right)\right) \\ &= \frac{1}{6n^2} + o\left(\frac{1}{n^2}\right) \\ &\underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \frac{1}{6n^2} \end{aligned}$$

et par comparaison avec une série de Riemann la série $\sum_{n \geq 2} v_n$ est absolument convergente et donc convergente. Mais pour tout $n \in \mathbb{N}^*$, $v_2 + \dots + v_n = \ln u_{n+1} - \ln u_1$. Donc la suite $(\ln u_n)$ est convergente et si λ est sa limite alors (u_n) converge vers $k = e^\lambda > 0$. On en déduit que $n! \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} k\sqrt{n}n^n e^{-n}$ et il nous faut encore calculer k . Grâce au lemme précédent et à cet équivalent, on a :

$$\begin{aligned} \frac{I_{2n}}{I_{2n+1}} &= \frac{(2n)!(2n+1)!}{2^{2n}(n!)^2 2^{2n}(n!)^2} \frac{\pi}{2} \\ &= \left(\frac{(2n)!}{2^{2n}(n!)^2}\right)^2 (2n+1) \frac{\pi}{2} \\ &\underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \left(\frac{k\sqrt{2n}(2n)^{2n} e^{-2n}}{2^{2n} k^2 n n^{2n} e^{-2n}}\right)^2 (2n+1) \frac{\pi}{2} \\ &\underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \left(\frac{\sqrt{2}}{k\sqrt{n}}\right)^2 (2n+1) \frac{\pi}{2} \\ &\underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \frac{\pi}{k^2} \frac{2n+1}{n}. \end{aligned}$$

Alors $\frac{I_{2n}}{I_{2n+1}} \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} \frac{2\pi}{k^2}$. Toujours d'après le lemme, on sait que cette limite vaut 1. On en déduit que $k = \sqrt{2\pi}$ et la formule de Stirling est démontrée. Voir aussi l'exercice ??.

2.5 Produit de Cauchy de deux séries complexes

DÉFINITION 2.5 ★ Produit de Cauchy
On considère deux séries complexes $\sum u_n$ et $\sum v_n$. On appelle *produit de Cauchy* de ces séries, la série $\sum w_n$ où

$$\forall n \in \mathbb{N}, \quad w_n = \sum_{k=0}^n u_k v_{n-k}$$

THÉORÈME 2.24 ★ Convergence d'un produit de Cauchy

On suppose que :

- (H1) La série $\sum u_n$ est absolument convergente.
- (H2) La série $\sum v_n$ est absolument convergente.

Alors la série $\sum w_n$ est absolument convergente, et

$$\sum_{n=0}^{+\infty} w_n = \left(\sum_{n=0}^{+\infty} u_n \right) \left(\sum_{n=0}^{+\infty} v_n \right)$$

Démonstration

1. **Absolue convergence de $\sum w_n$.** Soit $N \in \mathbb{N}$, on calcule

$$\begin{aligned} \sum_{n=0}^N |w_n| &= \sum_{n=0}^N \left| \sum_{k=0}^n u_k v_{n-k} \right| \\ &\leq \sum_{n=0}^N \sum_{k=0}^n |u_k| |v_{n-k}| \\ &= \sum_{(p,q) \in I} |u_p| |v_q| \quad (\text{voir figure}) \\ &\leq \sum_{0 \leq p, q \leq N} |u_p| |v_q| \\ &= \left(\sum_{p=0}^N |u_p| \right) \left(\sum_{q=0}^N |v_q| \right) \\ &\leq \left(\sum_{n=0}^{+\infty} |u_n| \right) \left(\sum_{n=0}^{+\infty} |v_n| \right) \end{aligned}$$

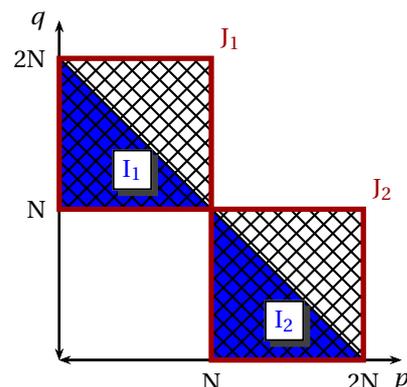
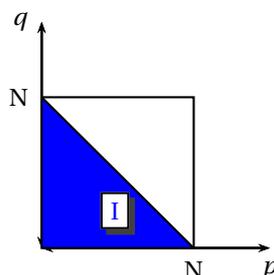
Par conséquent, la série $\sum w_n$ converge absolument.

2. **Valeur de la somme** Notons (S_n) , (V_n) et (W_n) les sommes partielles des séries $\sum u_n$, $\sum v_n$ et $\sum w_n$. Soit $N \in \mathbb{N}$. On estime :

$$\begin{aligned} |W_{2N} - S_N V_N| &= \left| \sum_{(p,q) \in I_1 \cup I_2} u_p v_q \right| \\ &\leq \sum_{(p,q) \in I_1 \cup I_2} |u_p| |v_q| \\ &\leq \sum_{(p,q) \in J_1 \cup J_2} |u_p| |v_q| \\ &= \left(\sum_{p=0}^N |u_p| \right) \left(\sum_{q=N+1}^{2N} |v_q| \right) + \left(\sum_{p=N+1}^{2N} |u_p| \right) \left(\sum_{q=0}^N |v_q| \right) \\ &\leq U(S_{2N} - S_N) + V(V_{2N} - V_N) \\ &\xrightarrow{N \rightarrow +\infty} 0 \end{aligned}$$

On en déduit puisque $S_{2N} \xrightarrow{N \rightarrow +\infty} U$ et que $V_{2N} \xrightarrow{N \rightarrow +\infty} V$ que $W_{2N} \xrightarrow{N \rightarrow +\infty} UV$. Mais comme la série $\sum w_n$ converge, il vient que

$$\sum_{n=0}^{+\infty} w_n = UV$$



THÉORÈME 2.25 ★ Exponentielle complexe

Soit un complexe $z \in \mathbb{C}$.

1. La série $\sum_{n \geq 0} \frac{z^n}{n!}$ converge absolument. On définit l'exponentielle du nombre complexe z par

$$e^z = \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{z^n}{n!}$$

2. Pour deux complexes $(z, z') \in \mathbb{C}^2$,

$$e^{z+z'} = e^z \times e^{z'}$$

Démonstration

1. Montrons que la série converge absolument. Si $z = 0$, c'est évident et $e^0 = 1$. Si $z \neq 0$, posons $a_n = \frac{|z|^n}{n!}$. Puisque

$$\frac{a_{n+1}}{a_n} = \frac{|z|}{n+1} \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} 0$$

la règle de d'Alembert montre que la série $\sum a_n$ converge.

2. En posant $u_n = \frac{z^n}{n!}$ et $v_n = \frac{z'^n}{n!}$, calculons le produit de Cauchy :

$$\begin{aligned} w_n &= \sum_{k=0}^n u_k v_{n-k} \\ &= \sum_{k=0}^n \frac{z^k z'^{n-k}}{n!(n-k)!} \\ &= \frac{1}{n!} \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} z^k z'^{n-k} \\ &= \frac{(z+z')^n}{n!} \quad (\text{binôme}) \end{aligned}$$

Par conséquent, puisque les deux séries $\sum \frac{z^n}{n!}$ et $\sum \frac{z'^n}{n!}$ convergent absolument, il en est de même de leur produit de Cauchy et

$$\sum_{n=0}^{+\infty} \frac{(z+z')^n}{n!} = \left(\sum_{n=0}^{+\infty} \frac{z^n}{n!} \right) \left(\sum_{n=0}^{+\infty} \frac{z'^n}{n!} \right)$$

2.6 Hors programme : séries de Bertrand

THÉORÈME 2.26 ★ Séries de Bertrand

Soient $\alpha, \beta \in \mathbb{R}$. La série de Bertrand

$$\sum \frac{1}{n^\alpha (\ln n)^\beta}$$

est convergente si et seulement si $[\alpha > 1 \text{ ou } [\alpha = 1 \text{ et } \beta > 1]]$.

Démonstration Notons $u_n = \frac{1}{n^\alpha (\ln n)^\beta}$. La série est à termes positifs.

- Si $\alpha > 1$, en posant $a = \frac{1+\alpha}{2}$, de telle façon que $1 < a < \alpha$, on a $n^a u_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} 0$ et donc la série $\sum u_n$ converge d'après la règle $n^\alpha u_n$.
- Si $\alpha < 1$, en posant $b = \frac{1+\alpha}{2}$, on a $\alpha < b < 1$ et donc $n^b u_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} +\infty$ et la série $\sum u_n$ diverge.
- Si $\alpha = 1$, on compare la série avec une intégrale et on montre qu'elle converge si et seulement si $\beta > 1$.

2.7 L'essentiel

1. Comprendre les définitions élémentaires. En particulier les notations $\sum u_n$ et $\sum_{n=0}^{+\infty} u_n$. Définition du reste d'une série convergente.

2. Toutes les propriétés des séries géométriques sont à connaître parfaitement.
3. La relation $u_n = S_n - S_{n-1}$ est fondamentale.
4. Les techniques d'étude de convergence d'une série sont à rapprocher de celles des intégrales généralisées :
 - La série diverge-t-elle grossièrement ? (comprendre la différence avec les intégrales généralisées)
 - Si la série n'est pas positive, étudier la convergence absolue.
 - Utiliser les critères des séries à termes positifs.
 - Chercher un équivalent de u_n et utiliser les séries de Riemann ou la règle $n^\alpha u_n$.
5. Bien étudier la comparaison série-intégrale et les techniques pour obtenir un équivalent de la somme partielle d'une série divergente et du reste d'une série convergente.
6. Le théorème de comparaison logarithmique est à connaître. La règle de Raabe-Duhamel est hors-programme, mais à savoir retrouver.
7. La règle de d'Alembert n'est pas une équivalence de convergence. Bien le comprendre.
8. Connaître parfaitement les séries alternées et le critère spécial (en particulier la majoration et le signe du reste ...).
9. Comprendre la technique « d'éclatement de termes » : Pour une série qui n'est pas à termes positifs, un équivalent ne suffit pas. Faire un développement asymptotique :

$$u_n = (-1)^n a_n + \underbrace{b_n}_{O_{n \rightarrow +\infty}(1/n^\alpha)}, \quad \alpha > 1$$

(la série $\sum b_n$ est absolument convergente et $\sum (-1)^n a_n$ est une série alternée).

10. La formule de Stirling est à connaître par coeur.
11. Théorème du produit de Cauchy : les deux séries sont *absolument* convergentes.